



■ PHYSIOLOGIE

Les capteurs s'approchent au plus près des processus biologiques.

■ ECHELLE DE MESURE

De la vision globale d'une parcelle à l'analyse des molécules chimiques.

■ AUTOMATISATION

L'acquisition de données est démultipliée par l'utilisation des capteurs.

LES CAPTEURS EN AGRICULTURE



L'acquisitions de données, prises indépendamment ou combinées (photos numériques, variations de couleurs...), est la base des outils d'aides à la décision.

© ARVALIS - Institut du végétal

FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS

DE LA MESURE PHYSIQUE à la variable agronomique

Rayonnement, température, teneur en eau du sol..., autant de données physiques ou chimiques que les capteurs sont capables de mesurer avec acuité, en vue notamment de produire plus et mieux. Du choix de leurs utilisations dépendront les applications en agriculture.

1972

marque le début du fonctionnement des satellites civils d'observation.

Les capteurs sont aujourd'hui très présents dans le secteur agricole. Les plus répandus sont les capteurs météorologiques dont les données sont intégrées dans de nombreux outils d'aide à la décision : évaluer le risque de développement des maladies (Miléos, Septolis, ...) ou encore la croissance des cultures (stades phénologiques, risque de stress hydrique, ...). Les capteurs utilisés pour mesurer les variables d'intérêt (température, humidité de l'air, rayonnement solaire, volume de précipitations, vitesse du vent) sont aujourd'hui standardisés. L'observation de la partie aérienne des cultures par capteurs est plus récente, elle est souvent désignée par « télédétection », pour les mesures par systèmes aériens, ou « proxidétection » lorsque les mesures sont effectuées au niveau du sol. L'observation aérienne a longtemps été un domaine réservé à l'armée. Parmi les dates

importantes, 1972 marque le début des satellites civils d'observation avec le lancement de Landsat 1.

La plante, capteur de rayonnement

La très grande majorité des capteurs utilisés pour caractériser l'état des cultures sont des capteurs de lumière transmise ou réfléchi par la plante ou ses organes. La plante elle-même peut être considérée comme un capteur qui transforme le rayonnement solaire reçu en biomasse grâce à la photosynthèse qui fixe le carbone atmosphérique. Les plantes réagissent à la quantité et à la qualité de la lumière pour orienter leur croissance. Elles sont par exemple sensibles à la présence de plantes concurrentes, qui vont intercepter certaines parties du rayonnement solaire.

La végétation recevant de la lumière peut l'absorber, la réfléchir ou la transmettre (*figure 1*) ; et ce de manière différente suivant la longueur d'onde,

(couleur composant cette lumière). Une végétation bien verte réfléchira plus fortement les longueurs d'onde dans le vert et absorbera plus fortement le bleu ou le rouge. En effet, la plante utilise principalement le rouge et le bleu comme source d'énergie

« **La mise en œuvre** des capteurs sur le terrain nécessite d'intégrer des contraintes opérationnelles. »

pour la photosynthèse. Ces longueurs d'ondes sont spécifiquement absorbées par une molécule complexe : la chlorophylle. Ce sera donc différent pour une culture sèche ou malade.

Des informations plus précises

Les capteurs apportent des informations très pertinentes sur l'état de santé des plantes. Ils permettent une analyse plus objective et plus complète que l'œil humain de la proportion du rayonnement solaire réfléchi (ou transmis) par la culture. Certaines longueurs d'ondes sont ainsi utilisées pour caractériser la quantité de chlorophylle contenue dans les feuilles.

D'autres capteurs mesurent à distance la température des feuilles. Ils sont sensibles à une autre partie du spectre lumineux, nommé infrarouge thermique. Cette information renseigne sur le fonctionnement hydrique instantané de la culture. Quand la plante est bien alimentée en eau, cette dernière circule du sol par les racines jusqu'aux feuilles, où elle s'évapore à travers les stomates. Ce processus refroidit la feuille qui a alors une température proche de celle de l'air. Lorsque le flux d'eau entre le sol et les feuilles est fortement diminué, quand il fait trop chaud ou que le sol est trop sec, la plante ferme ses stomates, limitant la transpiration et l'évaporation à la surface des feuilles. Il y a donc un échauffement de la surface de la feuille qui peut être mesuré par les capteurs thermiques, notamment en comparant l'écart entre la température de l'air et la température de la culture.



Electronique, optronique, écophysiologie, l'utilisation des capteurs fait appel à de multiples disciplines techniques et scientifiques (ici capteur de rayonnement).

Obtenir un signal numérique

Un capteur est un « transducteur », c'est-à-dire un objet ayant pour propriété de transformer une grandeur physique (lumière, pression, température, ...) en un signal électrique, en fonction de son intensité. Pour cela, le capteur est doté d'une surface sensible à la grandeur d'intérêt. La réponse générée, appelée signal analogique, est une variable continue. Ce capteur, pour plus de commodité, est généralement associé à divers composants qui facilitent la récupération de l'information : un convertisseur, qui transforme le signal analogique continu (tension ou intensité électrique) en signal numérique (une valeur numérique), une interface de communication (USB, Wifi, ...), une « intelligence », afin d'interpréter les commandes de contrôle (effectuer 5 mesures et calculer la moyenne par exemple), un système de stockage (carte SD, ...) et une source d'énergie pour faire fonctionner ces composants (piles, batterie équipée de panneaux solaires, ...).

La disponibilité en eau, un facteur essentiel

La plante a besoin d'énergie solaire, mais aussi d'azote, de phosphore ou de potassium pour synthétiser les molécules complexes, permettant aux cellules qui la composent de respirer ou de réaliser la photosynthèse. La majorité des cultures puise ces éléments minéraux dans l'eau du sol, par les racines. Connaître la disponibilité en eau pour la plante est ainsi essentiel : elle agit à la fois comme moteur de l'alimentation en éléments minéraux et elle contrôle l'ouverture des stomates, donc la fixation du carbone. L'eau dans le sol est quantifiée par la teneur en eau et par le potentiel matriciel (force de rétention dans le



Les capteurs, comme la mesure de l'indice foliaire, participent à une meilleure caractérisation de l'état des cultures.

sol). Ces grandeurs peuvent être mesurées par des capteurs utilisant la propagation d'une onde électromagnétique ou bien la conduction du courant, méthodes de plus en plus accessibles.

Les méthodes électromagnétiques à haute fréquence reposent sur le fort contraste entre la permittivité diélectrique de l'eau ($\epsilon = 80$) et celles des autres constituants du sol (ϵ de l'air = 1, ϵ des minéraux ≈ 4). La permittivité reflète la faculté du milieu à se polariser et celle de ses molécules à s'orienter dans le champ électrique. Les capteurs exploitant cette propriété de l'eau, pour déterminer la teneur en eau du sol, sont de trois grands types : les capteurs « capacitifs » (liés à la polarisation), les capteurs FDR (Frequency Domain Reflectometry) mesurant un décalage de fréquence et les capteurs TDR (Time Domain Reflectometry) mesurant le temps de propagation de l'onde.

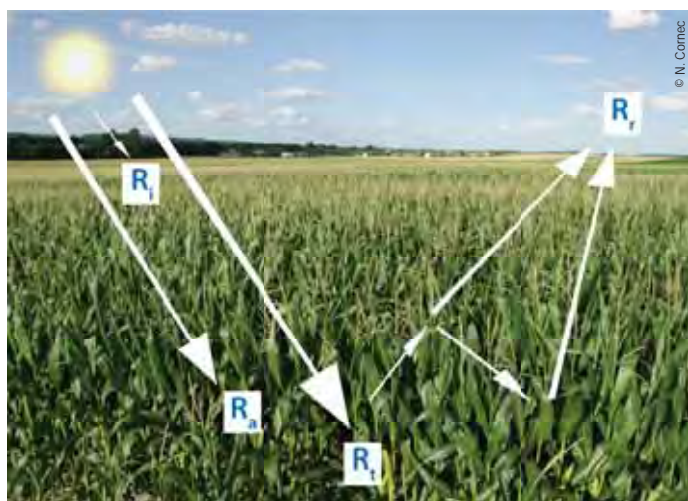
Le potentiel matriciel de l'eau peut être évalué par des tensiomètres mais des capteurs plus simples et robustes, utilisant une mesure électrique dans un milieu poreux de référence (en humidité ou résistivité), sont de plus en plus utilisés.

Toutes ces techniques fournissent des données ponctuelles dans l'espace, avec au mieux un profil de variation suivant la profondeur. Pour cartographier la variabilité hydrique verticale et horizontale, il est possible d'utiliser la tomographie de résistivité électrique qui nécessite le déploiement de lignes d'électrodes en surface.

Différentes contraintes techniques

Les grands principes de mesure et de caractérisation des cultures et de leur environnement sont assez simples et généraux : l'interaction entre un signal émis (lumière, courant électrique) et un matériau (plante, sol) va transformer ce signal dont la mesure renseigne sur les propriétés du matériau considéré. Cependant, leur mise en œuvre sur le terrain nécessite d'intégrer des contraintes opé-

RAYONNEMENT : les capteurs s'inspirent des phénomènes naturels



Lumière absorbée (R_a), transmise (R_t) ou réfléchi (R_r) par la végétation

Figure 1 : Interaction de la lumière solaire avec la végétation. La mesure de la lumière absorbée, transmise ou réfléchi rapportée au rayonnement solaire total (R_i) renseigne sur l'état de développement de la culture.

« Faire parler les données »

L'Homme est lui aussi un capteur, par exemple capable de transformer une observation visuelle, comme la présence de maladie en différents endroits d'une parcelle, en une information numérique (20 % des surfaces concernées, en moyenne). L'intérêt des capteurs n'est alors pas de remplacer l'observation humaine mais de la compléter ou de l'orienter. Par leurs propriétés, ils facilitent l'observation des cultures et de leur environnement, à savoir les « compartiments » plante, sol et air. Ainsi, les capteurs sont sensibles à des variables que l'homme ne peut voir (l'œil n'est sensible qu'à une petite fraction du spectre solaire), fournissant une richesse d'information inédite. Ils ont aussi l'avantage d'être programmables et automatisables. Ils permettent de disposer de données d'observation à une haute résolution spatiale et temporelle.

Cependant, ils ne possèdent qu'une « intelligence » très limitée se bornant à exécuter les ordres reçus. Extraire des informations utilisables est tout l'enjeu de l'intégration des capteurs dans des outils et des modèles élaborés par les experts. Un capteur donnera rarement, seul, une information suffisante pour prendre une décision.

rationnelles. Il faut déterminer le bon moment de la mesure (toutes les heures, tous les jours, à un stade précis...), le nombre de mesures nécessaires pour obtenir une valeur représentative de la parcelle (en particulier quand la mesure varie dans l'espace), mais aussi le coût des mesures au regard du service rendu.

Ces questions vont orienter l'intégration des capteurs dans des systèmes d'observation et le développement des chaînes de traitement des données qui leur sont associées. Les capteurs peuvent être valorisés dans plusieurs domaines d'application, porteurs de progrès technique : l'aide à la sélection et à l'évaluation variétale, l'aide au pilotage des cultures en cours de saison pour les agriculteurs ou encore l'aide à la conception et à l'évaluation de systèmes de cultures.

Benoît de Solan - b.desolan@arvalisinstitutduvegetal.fr

ARVALIS - Institut du végétal

Frédéric Baret - frederic.baret@paca.inra.fr

Claude Doussan - claudedoussan@paca.inra.fr

INRA